

## 冻融作用下地下水浅埋区土壤盐分及离子变化特征

刘 磊<sup>1</sup>, 陈军锋<sup>1</sup>, 吕棚棚<sup>1</sup>, 赵德星<sup>1</sup>, 杜 琦<sup>2</sup>(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024;  
2. 山西省水文水资源勘测总站太谷均衡实验站, 山西 太谷 030800)

**摘 要:** 冻融作用是地下水浅埋区土壤盐渍化的重要原因之一, 了解其对土壤盐分及离子变化的影响对土壤盐渍化防治具有重要意义。为探究冻融作用下土壤盐分及离子的分布及变化规律, 以太谷均衡实验站地中蒸渗仪系统为试验设备, 结合野外和室内试验分析了2020—2021年冻融期内6种不同地下水埋深下土壤剖面水分、可溶性盐分及离子含量的变化特征以及冻结层在冻融过程中对土壤盐分运移的影响, 并采用灰色关联法分析了土壤含盐量与离子间的关联度。结果表明: (1) 蒸渗仪土壤中以 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 及 $\text{Cl}^-$ 为主, 土壤含盐量与 $\text{Na}^+$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 极显著相关, 与 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Cl}^-$ 显著相关。(2) 冻结层在整个冻融过程中对于 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Cl}^-$ 变化影响较小, 对 $\text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 及土壤总盐分变化影响较大。当冻结层全部处于最大毛细水上升高度范围内时, 冻结层起积盐作用; 当冻结层未处于最大毛细水上升高度范围内时, 冻结层对于盐分运移起阻碍作用。(3) 土壤含盐量与地下水埋深之间呈反比关系。当地下水埋深为3.0 m时, 土壤含盐量变化值远小于0.5~2.5 m埋深。该研究可为地下水浅埋区土壤盐渍化的防治提供理论依据。

**关键词:** 冻融作用; 地下水埋深; 土壤盐分; 离子含量

土壤盐渍化的形成受自然环境和人类活动两者共同影响。我国约有 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 的盐渍化土地, 占全国可利用土地面积的4.88%<sup>[1]</sup>。在干旱半干旱地区, 降雨少而蒸发强烈, 盐分随着水分不断向地表处聚集, 季节性冻融循环更是加剧了这一过程<sup>[2-3]</sup>。已有研究表明, 地下水埋深<sup>[4-5]</sup>、土壤物理特性<sup>[6]</sup>、灌溉等均会影响土壤剖面盐分的分布。其中, 地下水埋深是影响土壤盐渍化的重要影响因素<sup>[7-10]</sup>, 地下水埋深越浅, 土壤积盐越严重, 二者之间满足指数关系<sup>[11-13]</sup>。明广辉等<sup>[4]</sup>分析了非冻期不同地下水埋深下土壤盐分聚集特征。陈乃嘉等<sup>[14]</sup>认为温度梯度和蒸发作用是冻融作用下影响土壤水盐运移的主要因素。李生伟<sup>[15]</sup>从盐渍土试验、水盐迁移机理、盐渍土力学性质、治理及改良措施等方面进行了总结。张殿发等<sup>[16]</sup>认为冻结过程中土壤盐分由

下部非冻层向上部冻结层运移。而邱国庆等<sup>[17]</sup>发现由于冻结锋面附近土壤盐分浓度较高, 冻结过程中盐分由冻结层向非冻层运移。张彧等<sup>[18]</sup>研究发现在冻融过程中土壤盐分在地表及地下1.0~2.5 m范围内会出现2个盐分聚集区域。靳志锋等<sup>[19]</sup>通过膜下滴灌棉田试验发现消融期土壤水分较为活跃, 土壤盐分变化量较大。

土壤盐分是由多种可溶性盐分离子及不溶性盐分组成, 冻融过程中土壤可溶性盐分及离子的变化特征对于季节性冻土区土壤盐渍化改善<sup>[20-21]</sup>、农作物生长<sup>[22]</sup>及水资源的合理开发利用具有一定的现实意义。本文以地中蒸渗仪系统为试验设备, 对冻融期土壤可溶性盐分离子含量进行测定, 探寻不同地下水埋深下土壤盐分离子在冻融过程中的分布及变化特征, 旨在为干旱半干旱季节性冻土区土

收稿日期: 2021-09-22; 修订日期: 2021-11-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41572239); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41502243); 山西省自然科学基金面上基金项目(201901D111053); 山西省水利科学技术研究与推广项目(2021LS006); 国家级大学生创新创业项目(202110112055, 202010112016)

作者简介: 刘磊(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水资源与水环境. E-mail: liulei4525@163.com

通讯作者: 陈军锋. E-mail: chenjunfeng@tyut.edu.cn

壤盐渍化防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省水文水资源勘测总站太谷均衡实验站,地理位置为37°26'N、112°30'E,海拔高度777 m,地处太原盆地东部,属暖温带大陆性半干旱季风气候,多年平均(1954—2017年)气温10.1℃,多年平均降水量452.1 mm,多年平均水面蒸发量1627.9 mm,多年平均风速0.9 m·s<sup>-1</sup>,多年平均相对湿度72%,多年平均冻深34~70 cm。历史最大冻深为92 cm(1960年)<sup>[23]</sup>,近5 a内最大冻深为70 cm(2016年)。试验期间(2020年11月15日至2021年3月15日)气象变化见图1。

1.2 试验方法

试验于2020年11月至2021年3月于山西省水文水资源勘测总站太谷均衡实验站进行,试验设备为蒸渗仪系统,土壤为均质砂壤土,具体参数见表1,地下水埋深分别为0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m、3.0 m。根据前人的划分依据<sup>[23-24]</sup>及2020—2021年冻融期土壤冻融特征将土壤冻融过程划分为3个阶段:不稳定冻结阶段(2020年11月15日至2020年12月3日)、稳定冻结阶段(2020年12月4日至2021年2月4日)和消融解冻阶段(2021年2月5日至2021年3月12日)。为了保证蒸渗仪系统土柱免遭破坏,选取3个冻融阶段中具有代表性的1 d,取土进行土壤含水率及盐分离子的监测,分别为2020年11月18日(D1)、2021年1月9日(D2)和2021年3月6日(D3)。监测深度依次为0 cm、5 cm、10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm、75 cm、100 cm、125 cm、150 cm、175 cm、200 cm,其中0.5 m、1.0 m、1.5 m埋深下最大监测深度分别为50 cm、100 cm、150 cm,2.0 m、2.5 m及3.0 m埋深下最大监测深度为200 cm。

不同深度下的土样经密封后带回实验室,采用烘干法测定土壤含水率,烘干后采用去离子水按照土水比1:5的比例配置土壤溶液<sup>[25]</sup>,震荡过滤后得

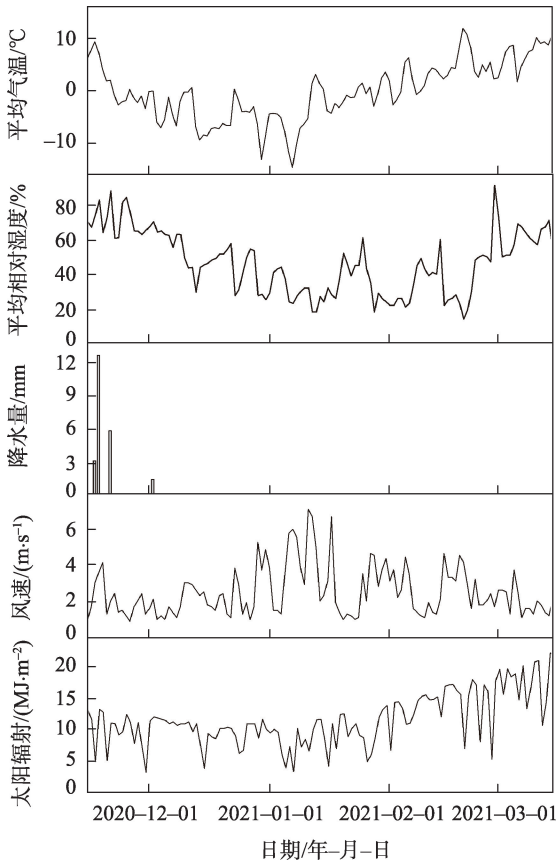


图1 试验期间主要气象因子变化

Fig. 1 Changes of main weather conditions during the experiment

到澄清的土壤浸提液。通过对浸提液中阴阳离子的测定计算土壤含盐量。其中K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>浓度通过原子分光光度计测定;Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度通过离子色谱仪测定;CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>及HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度通过酸碱滴定法测定;土壤含盐量为各离子含量总和。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面盐分离子相关性分析

测定结果表明,可溶性K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>及CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>离子在土壤中含量很低,测量准确度较差及测量误差较大,因此不对其进行分析,只对Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>及HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>5个离子进行分析。通过灰色关联法分析

表1 土壤物理特征参数

Tab. 1 The parameter of soil physical characteristic

土壤质地	不同粒径质量百分数/%			最大毛细水 上升高度/cm	给水度	干容重/(g·cm <sup>-3</sup> )
	黏粒 <0.002 mm	粉粒 0.002~0.02 mm	砂粒 >0.02 mm			
砂壤土	16.4	27.5	56.1	185	0.08	1.45

chinaXiv:202203.00092v1

土壤剖面含盐量与5个离子间的相关性,分析结果见表2,Na<sup>+</sup>及HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>与含盐量相关性极大,极显著相关,关联度分别为0.9及0.909;Ca<sup>2+</sup>及SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与含盐量相关性较大,关联度分别为0.817及0.806;Cl<sup>-</sup>与含盐量相关性一般,关联度为0.73。Ca<sup>2+</sup>与SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>相关性较大,显著相关,这是因为Ca<sup>2+</sup>容易与SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>及HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>形成沉淀。

表2 土壤剖面盐分离子间的相关性

Tab. 2 Correlation between salt ions in soil profile

离子种类	含盐量	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
含盐量	1					
Na <sup>+</sup>	0.900	1				
Ca <sup>2+</sup>	0.817	0.694	1			
Cl <sup>-</sup>	0.730	0.749	0.749	1		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.806	0.798	0.833	0.847	1	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.909	0.699	0.820	0.442	0.516	1

2.2 土壤剖面水分变化特征

由图2可见,在冻结过程中,0.5~2.0 m埋深下由于冻结层全部处于最大毛细水的上升范围内,整个土壤剖面土壤含水率均增加;2.5 m及3.0 m埋深下,由于冻结深度未达到最大毛细水的上升高度范围内,水分迁移主要发生在土壤水带及中间带,毛细水变化量很小<sup>[26-27]</sup>,土壤水分仅在0~40 cm增加,40~200 cm土壤水分基本保持不变。其中不稳定冻

结阶段土壤温度梯度较大,土壤水分运移速率较快,稳定冻结阶段土壤温度梯度减小,土壤水分运移速率减慢<sup>[23, 27]</sup>。因此,在D1-D2过程中,0.5~2.0 m埋深下土壤水分主要在0~40 cm增加。消融解冻阶段冻结层双向融化,地表蒸发强烈,所以D2-D3过程中0.5~2.0 m埋深下土壤水分主要由下部冻结层向上部消融锋面0~20 cm运移,下部冻结层及冻结层下部土壤水分下降;2.5 m及3.0 m埋深下土壤水分仅在冻结层0~30 cm增加,在30~200 cm水分进行了重分布。

2.3 冻融作用下土壤盐分离子变化特征

0.5 m埋深下,不稳定冻结阶段至稳定冻结阶段(D1-D2),在地表负积温的作用下冻结锋面持续下移,土壤水分不断向上部冻结锋面迁移,整个非饱和带土壤剖面均被冻结<sup>[24]</sup>。由图3a1~图3e1可见,随着水分上移Na<sup>+</sup>在冻结层中发生聚集;Ca<sup>+</sup>在冻结层中发生聚集,但在0~10 cm及40~50 cm增加量较多;Cl<sup>-</sup>在整个0~50 cm剖面上均增加,但由于不稳定冻结阶段土壤水分增加较多,Cl<sup>-</sup>在10~30 cm增加量较大;SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量仅在0~5 cm及40~50 cm有一定增加,可能是由于SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>在低温土壤溶液中迁移速率较慢;随着冻结过程中温度降低,Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>溶解度上升,冻结锋面处HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度较高,导致HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>由高浓度区域向低浓度区域运动,在冻结层两侧含量增加,在冻结层中部含量减少。在稳定冻结阶段至消融解冻阶段(D2-D3)土壤冻层双向融化,土壤蒸发强烈<sup>[22]</sup>,土壤水分主要由冻结层向地表运动,部分冻结层土壤水分融化后由向下运动补给地下水,随着土壤水分的运动,Na<sup>+</sup>随着表层土壤水分的蒸发,向地表0~10 cm以及40~50 cm迁移;Ca<sup>+</sup>含量在整个土壤剖面均增加;Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>主要在10~35 cm聚集;随着温度的升高,Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>溶解度下降,部分HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>会以晶体的形式析出,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量在整个0~50 cm土壤剖面均增加,其中10~30 cm增加较多。

1.0 m埋深下在1月9日冻结深度为69 cm,处于最大毛细水上升高度范围内,5个离子垂向分布特征见图3a2~图3e2。在不稳定冻结阶段至稳定冻结阶段(D1-D2),随着水分上移Na<sup>+</sup>主要由40~100 cm向10~40 cm运移;Ca<sup>+</sup>在整个土壤剖面上增加;Cl<sup>-</sup>含量在40~70 cm减少,在80~100 cm有较大增加,可能是冻结锋面处土壤盐分浓度较高,且80~100 cm土壤水分与地下水之间联系密切,导致Cl<sup>-</sup>由冻结锋面

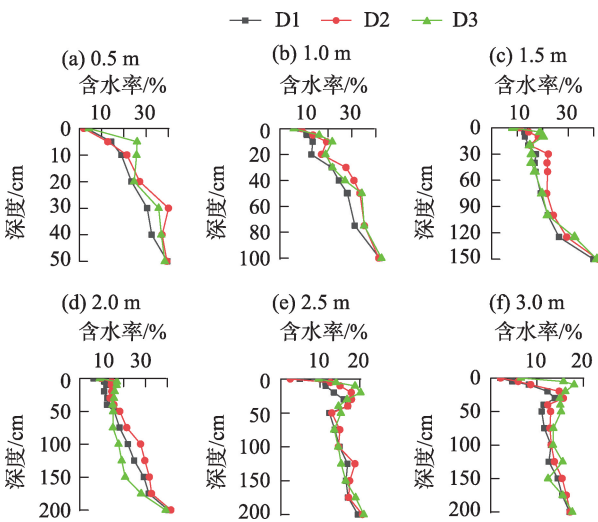


图2 冻融作用下不同地下水埋深下土壤含水率垂直分布特征

Fig. 2 Vertical distribution characteristics of soil water content under different groundwater depths during freeze-thaw period



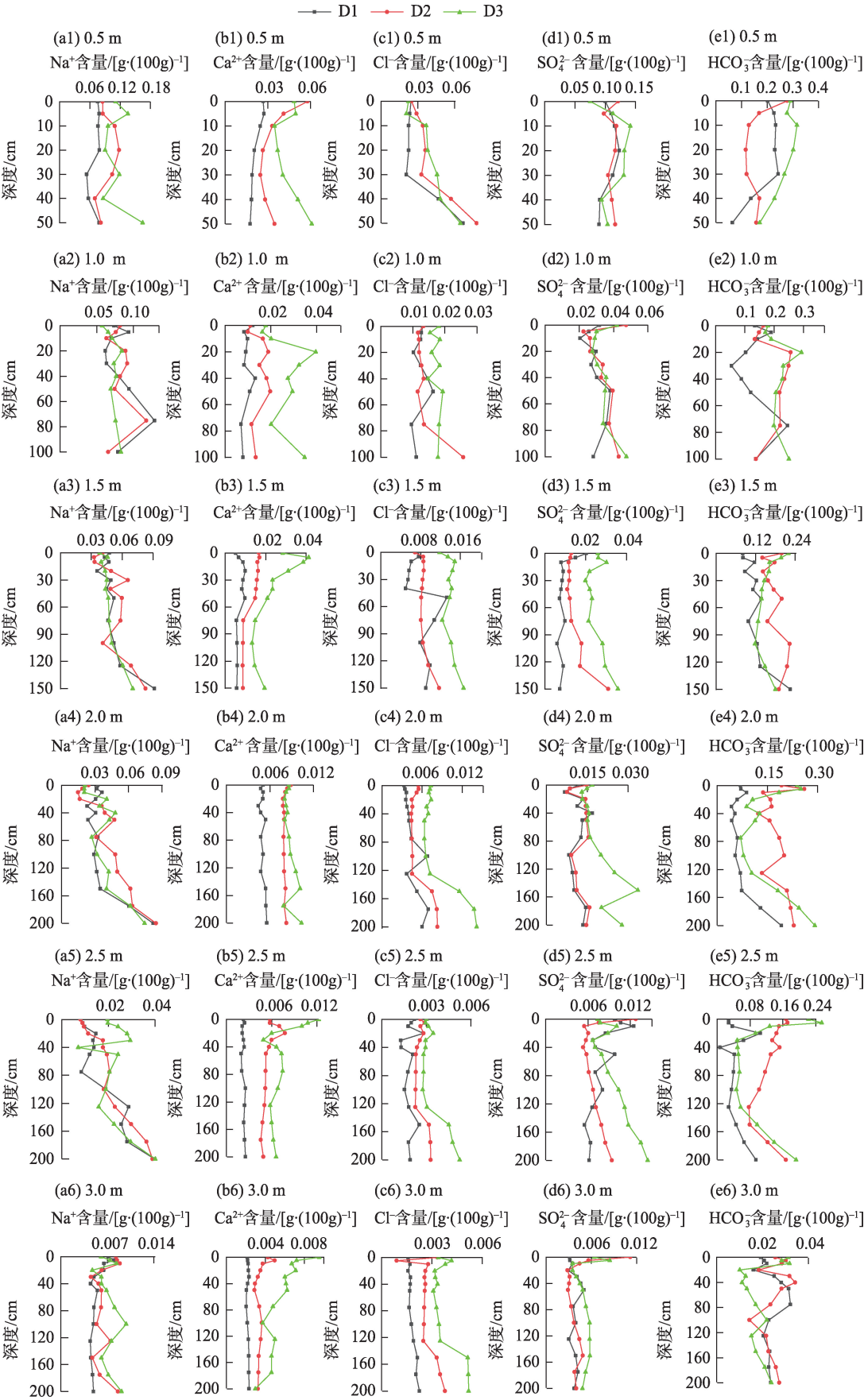


图3 冻融作用下不同地下水埋深下5个离子垂直分布特征

Fig. 3 Vertical distribution characteristics of the five ions under different groundwater depths during freeze-thaw period

向下运动;  $\text{SO}_4^{2-}$  含量在 0~70 cm 基本不变, 在 80~100 cm 增加;  $\text{HCO}_3^-$  含量在 10~70 cm 增加。稳定冻结阶段至消融解冻阶段(D2-D3), 在强烈的土壤蒸发作用下  $\text{Na}^+$  含量在地表 10~20 cm 增加;  $\text{Ca}^{2+}$  含量在整个土壤剖面上都增加, 其中 10~40 cm 增加量最多;  $\text{Cl}^-$  由下部非冻结层 80~100 cm 不断向上部消融锋面运动;  $\text{SO}_4^{2-}$  含量在整个土壤剖面上基本保持不变;  $\text{HCO}_3^-$  含量主要由 20~80 cm 向地表 0~10 cm 及下部 80~100 cm 运移。

1.5 m 埋深下在 1 月 9 日冻结深度为 52 cm, 5 个离子垂向分布特征见图 3a3~图 3e3。在不稳定冻结阶段至稳定冻结阶段(D1-D2)随着土壤水分上移,  $\text{Na}^+$  含量在冻结层 30~50 cm 及其下部 50~90 cm 增加;  $\text{Ca}^{2+}$  含量在整个土壤剖面上都增加, 其中上部冻结层 0~40 cm 增加较多;  $\text{Cl}^-$  主要由 40~90 cm 向上部 0~40 cm 运移;  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  含量在整个土壤剖面上都增加。在稳定冻结阶段至消融解冻阶段(D2-D3),  $\text{Na}^+$  伴随着土壤水分的双向运移进行运动, 主要由 20~80 cm 向两侧 0~20 cm 及 80~100 cm 运移;  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$  及  $\text{SO}_4^{2-}$  含量在整个土壤剖面上都增加;  $\text{HCO}_3^-$  主要由 30~140 cm 向上部 0~30 cm 运移。

2.0 m 埋深下在 1 月 9 日冻结深度为 43 cm, 部分冻结层处于最大毛细水上升高度范围内, 5 个离子垂向分布特征见图 3a4~图 3e4。在不稳定冻结阶段至稳定冻结阶段(D1-D2),  $\text{Na}^+$  主要在冻结层下部 40~160 cm 聚集;  $\text{Ca}^{2+}$  及  $\text{HCO}_3^-$  含量在整个土壤剖面上都增加;  $\text{Cl}^-$  由 80~120 cm 向 0~60 cm 及 120~200 cm 运移;  $\text{SO}_4^{2-}$  含量在整个土壤剖面上基本保持不变。在稳定冻结阶段至消融解冻阶段(D2-D3),  $\text{Na}^+$  主要由非冻结层向上运移, 主要在 0~30 cm 聚集;  $\text{Ca}^{2+}$  含量基本保持不变;  $\text{Cl}^-$  含量在整个土壤剖面上都增加;  $\text{SO}_4^{2-}$  主要在 0~30 cm 冻结层及 80~200 cm 毛细水带增加;  $\text{HCO}_3^-$  含量主要在 30~120 cm 减少, 其他深度土壤剖面中基本保持不变。

2.5 m 及 3.0 m 埋深下在 1 月 9 日冻结深度分别为 36 cm 和 34 cm, 未处于最大毛细水上升高度的临界范围内, 5 个离子垂向分布特征分别见图 3a5~图 3e5 和图 3a6~图 3e6。在不稳定冻结阶段至稳定冻结阶段(D1-D2),  $\text{Na}^+$  含量基本保持不变, 仅在剖面上进行了重分布, 主要在 40~100 cm 聚集;  $\text{Ca}^{2+}$  及  $\text{Cl}^-$  含量在整个土壤剖面均增加;  $\text{SO}_4^{2-}$  主要由冻结层及其下部 35~100 cm 非冻结层向下运移; 2.5 m 埋深下

$\text{HCO}_3^-$  含量整个土壤剖面上都增加, 3.0 m 埋深下  $\text{HCO}_3^-$  主要由 50~120 cm 非冻层向上部 0~40 cm 冻结层运移。在稳定冻结阶段至消融解冻阶段(D2-D3), 2.5 m 埋深下  $\text{Na}^+$  主要在 0~30 cm 冻结层聚集; 2.5 m 和 3.0 m 埋深下  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  含量在整个土壤剖面上都增加;  $\text{HCO}_3^-$  主要在 0~20 cm 上部冻结层聚集。

最大毛细水上升高度与冻深之间的关系对于土壤水分变化有较大影响<sup>[26-27]</sup>, 而土壤水分运动是土壤盐分离子运移的主要载体, 因此冻结层位置对于土壤盐分离子的运移有着重要影响。其中,  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Cl}^-$  受冻结层影响较小, 在冻融过程中变化量较小; 而  $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  受冻结层影响较大, 在冻融过程中变化量较大。

当冻结层全部处于最大毛细水上升高度范围内时, 即 0.5~1.5 m 埋深下, 5 个离子在冻融过程中的变化均较为明显, 5 个离子均在冻融作用下在冻结层聚集, 冻结层起积盐作用。当冻结层部分处于最大毛细水上升范围内时, 即 2.0 m 埋深下, 土壤盐分离子变化复杂,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{HCO}_3^-$  在冻融作用下在冻结层及其下部积聚。  $\text{Na}^+$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  在冻融作用下以最大毛细水上升高度为分界线, 其上部冻结层中  $\text{Na}^+$  含量减少,  $\text{SO}_4^{2-}$  含量增加, 下部冻结层中  $\text{Na}^+$  含量增加,  $\text{SO}_4^{2-}$  含量基本不变, 非冻层中  $\text{Na}^+$  含量基本不变,  $\text{SO}_4^{2-}$  含量增加。可见, 此时冻结层对于  $\text{HCO}_3^-$  起积聚作用, 对于  $\text{Na}^+$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  起一定的阻碍作用, 同时由于  $\text{Na}^+$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  在不同温度下迁移速率不同, 导致二者分布情况存在差异。当冻结层未处于最大毛细水上升高度范围内时, 即 2.5 m 和 3.0 m 埋深下, 5 个离子受冻融作用的影响较小,  $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  在冻融作用下进行了重分布, 主要在冻结层积聚;  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$  含量在整个土壤剖面上都增加, 冻结层中离子含量增加量更多, 此时冻结层对离子运移起阻碍作用。

## 2.4 冻融作用下土壤含盐量变化特征

图 4 为冻融作用下土壤含盐量垂向分布特征, 在不稳定冻结阶段至稳定冻结阶段(D1-D2), 0.5 m 埋深下土壤含盐量在冻结作用下进行了重分布, 主要由中间冻结层 5~35 cm 向上部地表 0~5 cm 及下部 35~50 cm 运移; 1 m 埋深下土壤含盐量主要在 0~60 cm 冻结层增加, 下部 70~100 cm 非冻层土壤含盐量基本保持不变; 1.5 m、2.0 m 及 2.5 m 埋深下, 整个垂

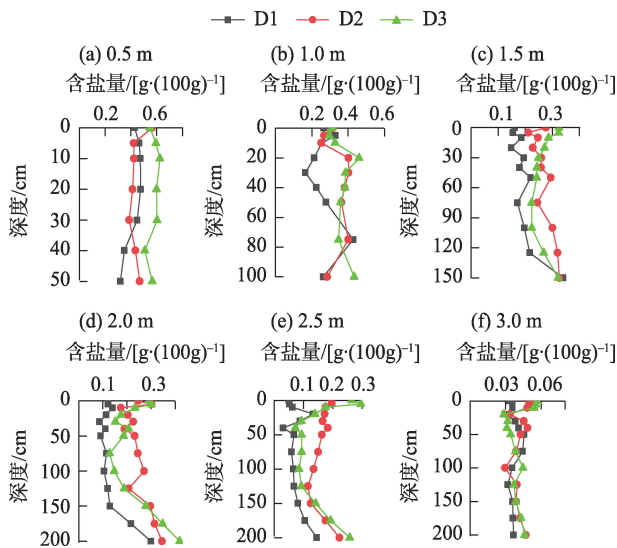


图4 冻融作用下不同地下水埋深下土壤含盐量垂直分布特征

Fig. 4 Vertical distribution characteristics of soil salt content under different groundwater depths during freeze-thaw period

向剖面土壤含盐量不断增加,但土壤含盐量变化值增加量随地下水埋深增加逐渐变小;3.0 m埋深下土壤含盐量基本保持不变。在稳定冻结阶段至消融解冻阶段(D2-D3),随着冻结层的消融以及强烈的土壤蒸发,0.5 m埋深下整个冻结层中土壤含盐量增加;1.0 m埋深下土壤含盐量仅在上部冻结层0~20 cm增加,其他埋深下基本不发生变化;1.5 m埋深下上部冻结层0~30 cm中土壤含盐量增加,下部冻结层30~52 cm及下部非冻层55~150 cm土壤含盐量减少;2.0 m、2.5 m埋深下土壤含盐量在上部冻结层0~20 cm增加,冻结层下部40~120 cm土壤含盐量减少;3.0 m埋深下土壤含盐量基本保持不变。

可见,土壤含盐量随着地下水埋深增加逐渐减小,当地下水埋深为3.0 m时,土壤含盐量变化值很小,可认为在冻融过程中当地下水埋深大于3.0 m时土壤含盐量基本不受地下水的影响,仅在剖面上进行重分布。当冻结层深度处于最大毛细水上升高度范围内时,土壤含盐量主要在冻结层积聚;当冻结层深度未达到最大毛细水上升高度范围内时,冻结层对于土壤盐分的运移起着阻碍作用,土壤总盐分含盐量主要积聚在冻结层下部。

### 3 结论

本文通过冻融期3个不同冻融阶段下地中蒸渗仪中土壤盐分及离子监测试验,分析了冻融期6种

不同地下水埋深下土壤盐分及离子变化特征,得出以下结论:

(1) 地中蒸渗仪土壤中主要阳离子为 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ ,主要阴离子为 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Cl}^-$ 。土壤含盐量与 $\text{Na}^+$ 及 $\text{HCO}_3^-$ 之间极显著相关,与 $\text{Ca}^{2+}$ 及 $\text{SO}_4^{2-}$ 之间显著相关。土壤可溶性阳离子中 $\text{Na}^+$ 含量最高, $\text{Ca}^{2+}$ 次之;阴离子中 $\text{HCO}_3^-$ 含量最高,其次是 $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{Cl}^-$ 含量最低。

(2) 冻结层对于 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Cl}^-$ 的影响较小,对于 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 影响较大。当冻结层全部处于最大毛细水上升高度范围内时,冻结层起积盐作用;当冻结层处于最大毛细水上升高度的临界范围时,对于 $\text{Na}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 运动起一定的阻碍作用;当冻结层未处于最大毛细水上升高度范围内时,冻结层对于 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 起阻碍作用。

(3) 当冻结层全部处于最大毛细水上升高度范围内时,土壤含盐量在冻结层积聚;当冻结层未达到最大毛细水上升高度范围时,冻结层对土壤盐分运移起阻碍作用,土壤含盐量主要积聚在冻结层下部及地表。

(4) 冻结阶段土壤盐分主要由非冻层向冻结层进行运移,消融阶段土壤盐分由消融锋面不断向上向下运移。随着地下水埋深的增加,土壤含盐量增加值逐渐降低,土壤含盐量与地下水埋深呈反比关系。当地下水埋深大于3.0 m时,土壤含盐量在冻融过程中基本不受地下水影响。

### 参考文献(References):

- [1] 李建国, 濮励杰, 朱明, 等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1233-1245. [Li Jianguo, Pu Lijie, Zhu Ming, et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1233-1245.]
- [2] Han Y, Wang Q, Xia W, et al. Experimental study on the hydraulic conductivity of unsaturated dispersive soil with different salinities subjected to freeze-thaw[J]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124297.
- [3] 窦旭, 史海滨, 李瑞平, 等. 乌拉特灌域土壤剖面盐分季节性分布特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1148-1155. [Dou Xu, Shi Haibin, Li Ruiping, et al. The analysis of the seasonal distribution characteristics of soil salinity in the Wulat irrigation area[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1148-1155.]
- [4] 明广辉, 田富强, 胡宏昌. 地下水埋深对膜下滴灌棉田水盐动态影响及土壤盐分累积特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 90-



97. [Ming Guanghui, Tian Fuqiang, Hu Hongchang. Effect of water table depth on soil water and salt dynamics and soil salt accumulation characteristics under mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 90-97. ]
- [5] 刘秀强, 陈喜, 张阳阳, 等. 青土湖土壤剖面盐分特征及其定量表述研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1174-1182. [Liu Xiuqiang, Chen Xi, Zhang Yangyang, et al. Study on salt distribution characteristics and mathematical expression of the soil profile in Qingtu Lake[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1174-1182. ]
- [6] Butcher K, Wick A, DeSutter T, et al. Corn and soybean yield response to salinity influenced by soil texture[J]. Agronomy Journal, 2018, 110(4): 1243-1253.
- [7] Li K, Chen J, Tan M, et al. Spatio-temporal variability of soil salinity in alluvial plain of the lower reaches of the Yellow River: A case study[J]. Pedosphere, 2011, 21(6): 793-801.
- [8] Wang D, Zhao C, Zheng J, et al. Evolution of soil salinity and the critical ratio of drainage to irrigation (CRDI) in the Weigan Oasis in the Tarim Basin[J]. Catena, 2021, 201: 105210.
- [9] Li S, Qin P. Analysis of soil salinization and influence of groundwater depth in the North of Shandong Marine Plain[J]. Earth and Environmental Science, 2020, 525: 12136.
- [10] Zied H, Hashemi H, Bouri S. Soil salinization and critical shallow groundwater depth under saline irrigation condition in a Saharan irrigated land[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(14): 301.
- [11] 崔亚莉, 张德强, 邵景力, 等. 地下水浅埋区土壤水TDS变化规律分析[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 185-188. [Cui Yali, Zhang Deqiang, Shao Jingli, et al. Study on variation and influence factor of soil-water TDS in shallow groundwater areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1): 185-188. ]
- [12] 马贵仁, 屈忠义, 王丽萍, 等. 基于ArcGIS空间插值的河套灌区土壤水盐运移规律与地下水动态研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 208-216. [Ma Guiren, Qu Zhongyi, Wang Liping, et al. Research on soil water and salt movement and groundwater dynamics Hetao irrigation district based on ArcGIS spatial interpolation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 208-216. ]
- [13] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 198-206. [Guan Xiaoyan, Wang Shaoli, Gao Zhanyi, et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 198-206. ]
- [14] 陈乃嘉, 宋培源, 李嘉瑞. 冻融作用下的土壤水盐运移特征研究[J]. 节水灌溉, 2014(5): 52-54, 58. [Chen Naijia, Song Peiyuan, Li Jiarui. Research on soil water and salt transportation characteristics under the effect of freezing and thawing[J]. Water Saving Irrigation, 2014(5): 52-54, 58. ]
- [15] 李生伟. 冻融循环作用下寒旱区盐渍土中水、盐迁移研究综述[J]. 水利水电技术, 2020, 51(9): 205-215. [Li Shengwei. Overview on study of water-salt migration in saline soil in cold-arid region under freeze-thawing cycle[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(9): 205-215. ]
- [16] 张殿发, 郑琦宏. 冻融条件下土壤中水盐运移规律模拟研究[J]. 地理科学进展, 2005, 24(4): 46-55. [Zhang Dianfa, Zheng Qihong. Simulation of water-salt movement law under the freeze-thawing condition[J]. Progress in Geography, 2005, 24(4): 46-55. ]
- [17] 邱国庆, 王雅卿, 王淑娟. 冻结过程中的盐分迁移及其与土壤盐渍化的关系[J]. 土壤肥料, 1992(5): 15-18. [Qiu Guoqing, Wang Yaqing, Wang Shujuan. Salt migration during freezing process and its relationship with soil salinization[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 1992(5): 15-18. ]
- [18] 张彧, 房建宏, 刘建坤, 等. 察尔汗地区盐渍土水热状态变化特征与水盐迁移规律研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1344-1348. [Zhang Yu, Fang Jianhong, Liu Jiankun, et al. Variation characteristics of hydrothermal state and migration laws of water and salt in Qarhan salt lake region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1344-1348. ]
- [19] 靳志锋, 虎胆·吐马尔白, 牟洪臣, 等. 土壤冻融温度影响下棉田水盐运移规律[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 623-627. [Jin Zhifeng, Hudan Tumarbay, Mou Hongchen, et al. Soil water and salt migration in cotton field under soil freezing-thawing temperature[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(4): 623-627. ]
- [20] 张华艳, 牛灵安, 郝晋珉, 等. 黑龙江流域微地貌与地下水埋深对土壤潜在盐渍化的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 83-90. [Zhang Huayan, Niu Ling'an, Hao Jinmin, et al. Effect of micro-topography and groundwater depth on soil potential salinization in Heilonggang Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 83-90. ]
- [21] Bezborodov G, Shadmanov D, Mirhashimov R, et al. Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, 138(1): 95-102.
- [22] 郝远远, 徐旭, 黄权中, 等. 土壤水盐与玉米产量对地下水埋深及灌溉响应模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 128-136. [Hao Yuanyuan, Xu Xu, Huang Quanzhong, et al. Simulation of response of soil water salt and corn yield to groundwater depth and irrigation[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2014, 30(20): 128-136. ]
- [23] 陈军锋, 郑秀清, 张永波, 等. 季节性冻融期不同潜水位埋深下土壤蒸发规律模拟研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 131-140. [Chen Junfeng, Zheng Xiuqing, Zhang Yongbo, et al. Simulation of soil moisture evaporation under different groundwater level depths during seasonal freeze-thaw period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 131-140. ]
- [24] Chen Junfeng, Gao Xuguang, Zheng Xiuqing, et al. Simulation of soil freezing and thawing for different groundwater table depths[J].

- Vadose Zone Journal, 2019, 18(1): 1–14.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Study of Analysis of Soil and Agrochemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. ]
- [26] 原国红. 季节冻土水分迁移的机理及数值模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2006. [Yuan Guohong. The Mechanism and Numerical Simulation of Water Transfer in Seasonal Freezing Soil[D]. Changchun: Jilin University, 2006. ]
- [27] 王永琦, 苏小四, 吕航, 等. 冻融作用对土壤水分迁移和地下水位波动影响的实验研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 204–209. [Wang Yongqi, Su Xiaosi, Lyu Hang, et al. Freeze-thaw effect on soil water migration and groundwater level fluctuation[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science Edition), 2020, 56(2): 204–209. ]

## Variation in soil salinity and ions in a shallow groundwater area under freeze-thaw

LIU Lei<sup>1</sup>, CHEN Junfeng<sup>1</sup>, LYU Pengpeng<sup>1</sup>, ZHAO Dexing<sup>1</sup>, DU Qi<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China; 2. Taigu Water Balance Experimental Field, Bureau of Hydrology and Water Resources Survey of Shanxi Province, Taigu 030800, Shanxi, China)

**Abstract:** In shallow groundwater areas, freeze-thaw is one of the most important factors affecting the soil salinization process. Determining the variation in soil salinity and different soil salinity ions during the freeze-thaw process is of great significance for the prevention and control of soil salinization in seasonal freeze-thaw areas. A ground lysimeter system located on Taigu Water Balance Experimental Field was used to examine soil salinity and soil salinity ions. The ground lysimeter system had six different groundwater depths (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m, and 3.0 m) and the soil water content, soluble soil salinity content, and content of soluble soil salinity ions were analyzed during the freeze-thaw period from 2020 to 2021. Correlations between the soil salt content and five salinity ions were analyzed using the Gray correlation method. The results showed that the soluble salinity ions in the soil mainly consisted of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , and  $\text{Cl}^-$ . The correlation analysis revealed that the soil salt content of soil was highly significantly correlated with  $\text{Na}^+$  and  $\text{HCO}_3^-$ , and significantly correlated with  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ . The position of the frozen layer had a strong influence on changes in  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , and soil salt content throughout the freeze-thaw process; however,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Cl}^-$  were less affected by the frozen layer. When the entire frozen layer was within the maximum capillary water rise height, salt accumulation in the frozen layer was obvious. However, the frozen layer acted as an obstruction when it was not within the maximum capillary water rise height. There was an inverse relationship between the groundwater depth and soil salt content. When the depth of groundwater was 3.0 m, the change in soil salt content was much lower than that at groundwater depths of 0.5–2.5 m. These results provide a theoretical basis for the prevention and control of soil salinization in shallow groundwater areas.

**Keywords:** freeze-thaw action; groundwater depth; soil salinity; ion content